

# 폴리머 링 공진기 기반의 스위치를 이용한 집적광학 채널 선택 마이크로웨이브 대역통과 필터

김건덕 · 이상신<sup>†</sup>

광운대학교 전자공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2006년 12월 13일 받음, 2007년 2월 16일 수정본 받음)

본 논문에서는 서로 다른 FSR (free spectral range)을 갖는 두 개의 가변 (tunable) 폴리머 링 공진기 기반의 1x2 스위치를 이용하여 광학적 방식의 채널 선택이 가능한 재구성형 (reconfigurable) 마이크로웨이브 (microwave: MW) 필터를 제안하고 구현하였다. 각 링 공진기는 두 개의 링이 연결되어 있으며 한 개의 링 위에 전극이 형성되어 있으며, 이 전극에 전압을 인가함으로써 열광학효과를 통해 On/Off 스위치로서 동작된다. 입력 MW 신호에 의해서 변조된 광신호를 이 스위치를 통해 특정 포트로 라우팅(routing)하고 광검출기를 통해 복원함으로써 두 개의 채널이 선택되는 MW 대역통과 필터 특성을 얻었다. 중심주파수가 10 GHz인 채널 I 이 선택된 경우, 소멸비는 ~30 dB, 대역폭은 1 GHz, Q값은 10, 최대 소비전력은 4.1 mW였다. 그리고 중심주파수가 20 GHz인 채널 II 가 선택된 경우에는 소멸비는 ~30 dB, 대역폭은 2 GHz, Q값은 10, 최대 소비전력은 8 mW였으며, 각 채널 간의 격리도는 24 dB 이상이 었다.

주제어 : Photonic microwave filter, Ring resonator, Thermo-optic effect, Channel selective filter.

## I 서 론

최근에 광학적으로 RF (radio frequency) 및 마이크로웨이브 (microwave: MW) 신호를 처리할 수 있는 기술이 무선통신과 광통신 기술이 결합된 RoF (radio over fiber) 시스템, MTI (moving target identification) 지상레이더 시스템, 위성통신 시스템, 위상배열 안테나, THz 신호처리 등의 다양한 분야에 응용되어 왔다.<sup>[1,2]</sup> 특히 광학적 방식의 MW 대역통과 필터는 채널 선택, 채널 간의 간섭 및 잡음 제거 등을 위해 사용되는 핵심 요소 중의 하나이다. 이러한 소자는 기존의 전기적 방식에 비해 경량, 전자기간섭에 무관, 적은 입력손실 등의 장점을 갖고 있다.<sup>[3-5]</sup> 한편, 지금까지는 휴대폰, 무선랜, RFID, 위성통신 등의 무선통신 서비스를 제공하기 위한 시스템들은 서로 다른 주파수 대역(채널)을 사용하여 독립적으로 구현되었다. 그러나 차세대 무선통신 시스템은 경제성, 소형화, 저전력 등의 목적으로 이러한 개별 시스템들을 통합하여 구현될 것으로 예상된다.<sup>[6]</sup> 특히 SDR (software defined radio) 등의 기술을 이용한 차세대 통합시스템을 효과적으로 구현하기 위해서는 다중 채널을 전기적으로 선택할 수 있는 재구성형 (reconfigurable) MW 대역통과 필터가 필수적이다.<sup>[7,8]</sup> 최근에는 브래그 격자 기반의 음향광학 변조기 등을 이용하여 이러한 소자를 광학적 방식으로 구현한 결과가 보고 되었다.<sup>[9,10]</sup>

본 논문에서는 폴리머 링 공진기 기반의 1x2 스위치를 이용하여 전기적으로 채널 선택이 가능한 광학적 방식의 재구성형 MW 대역통과 필터를 제안하고 구현하였다. 제안된 광

스위치는 입력 버스에 서로 다른 공진 특성, 즉 FSR (free spectral range)을 갖는 두 개의 가변 (tunable) 링 공진기가 결합되어 있는 구조를 갖는다. 여기서 각 링 공진기는 두 개의 링이 연결되어 이루어져 있으며, 한 개의 링 위에 형성된 전극에 인가되는 전압/전력에 의하여 발생하는 열광학효과를 통해 출력특성이 조절되는 On/Off 스위치로서 동작한다. 따라서 MW 신호에 의해서 변조된 광신호를 제안된 스위치를 통해 특정 포트로 라우팅 (routing)하고 광검출기를 통해 복원함으로써 전기적으로 채널이 선택되는 MW 대역통과 필터 특성을 얻을 수 있다.

## II. 제안된 광학적 MW 대역통과 필터의 동작원리 및 설계

제안된 가변 링 공진기 기반의 1x2 열광학 스위치의 구조가 그림 1(a)에 도시되어 있다. 이것은 입력 버스, 동일한 두 개의 링이 연결된 공진기 I 과 II, 출력 포트로 사용되는 버스 I 과 II, 그리고 공진기 중 한 개의 링 위에 형성된 전극 I 과 II로 구성되어 있다. 먼저, 전달매트릭스 방법<sup>[11]</sup>을 이용하여 제안된 광스위치의 동작특성을 분석한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 공진기 I 의 경우, 전극에 전압이 인가되지 않은 경우( $V_{c1}=0$ )에는 두 개의 링 반경이  $R_1$ 으로 동일하기 때문에 FSR인  $\Delta\lambda_{FSR1} = \frac{c_0}{n_1 2\pi R_1}$  을 주기로 갖는 공진파장 대역에서 출력이 최대가 되는 대역통과 광필터 특성이 포트 I 에서 얻어진다. 여기서  $c_0$ 는 진공 중에서의 빛의 속도,  $n_1$ 은 링 도파모드의 유효굴절률이다. 한편, 전극에 전압이 인가되면 ( $V_{c1} \neq 0$ ) 두 개의 링 도파모드 간에 열광학효과에 의

<sup>†</sup> E-mail: slee@kw.ac.kr

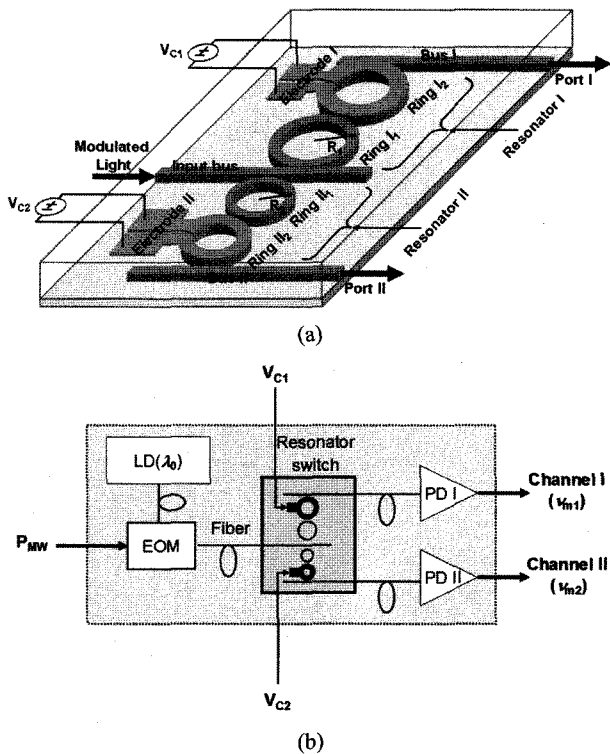


그림 1. 제안된 광스위치를 이용한 채널 선택 재구성형 MW 대역 통과 필터.

- (a) 폴리머 링 공진기 기반의 1x2 열광학 스위치
- (b) 제안된 채널 선택형 MW 필터 구조

하여 유발된 위상변화  $\Delta\phi$ 로 인하여 공진파장 대역에서의 포트 I 의 출력 광파워가 감소하게 된다. 그림 2에는 유도된 위상변화에 따른 포트 I 에서의 이론적인 광출력 특성이 도시되어 있다.  $\Delta\phi=0$ 인 경우에는  $\Delta\lambda_{FSR1}$  간격으로 공진파장 대역에서 최대 출력이 얻어지고,  $\Delta\phi$ 가 증가함에 따라 출력이 급격히 감소하며, 특히  $\Delta\phi=\pi$ 가 될 때 최소가 된다. 따라서 공진기 I 은 전기적으로 위상변화  $\Delta\phi$ 를 0에서  $\pi$ 까지 변화시킴으로써 On/Off 스위치로 동작할 수 있다<sup>[12,13]</sup>. 공진기 II 의 경우에는 구성 요소인 링의 반경이  $R_2$ 이기 때문에 주기가  $\Delta\lambda_{FSR2} = \frac{c_0}{n_2 2\pi R_2}$ 로 주어지며, 기본적인 동작특성은 공진기 I 과 동일하다. 여기서  $n_2$ 는 링 도파모드의 유효굴절률이다. 결과적으로 두 개의 가변 링 공진기가 결합된 소자는 공진파장을 갖는 입력 광신호를 특정 출력 포트에 라우팅할 수 있는 1x2 광스위치로서 동작함을 알 수 있다. 즉, 공진기 I 이 On되고 공진기 II 가 Off된 경우에는 포트 I 에서 주기가  $\Delta\lambda_{FSR1}$ 인 대역통과 광필터 특성이 얻어진다. 반대로, 공진기 II 가 On되고 공진기 I 이 Off된 경우에는 주기가  $\Delta\lambda_{FSR2}$ 인 대역통과 특성이 포트 II 에서 얻어진다.

본 논문에서 구현하고자 하는 가변 링 공진기형 1x2 스위치를 이용한 채널 선택 재구성형 MW 필터의 기본적인 구조가 그림 1(b)에 도시되어 있다. 이것은 단일파장 ( $\lambda_0 \approx 1550$

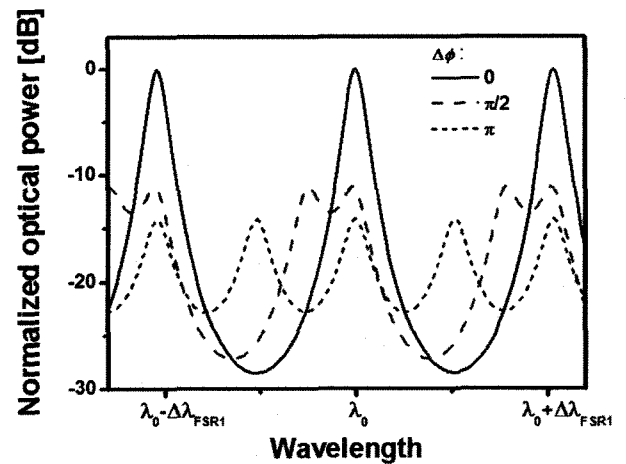


그림 2. 광스위치를 구성하는 공진기 I 의 인가 전압에 따른 전달특성.

nm) 광원 (laser diode: LD), 전기광학 변조기 (electrooptic modulator: EOM), 링 공진기형 스위치, 그리고 광검출기 PD (photodetector) I 과 PD II 로 구성되어 있다. 입력 MW 신호는 변조기를 통해 광신호에 실리고, 이 광신호는 스위치에 입력된 후, 인가 전압에 따라 스위치의 각 포트에 라우팅되어 PD에 의해 복원된다. 먼저, 채널 I 에서의 이론적인 전달 특성을 살펴보면, 전극 I 의 인가전압이  $V_{c1}=0$ 인 경우 (즉  $\Delta\phi=0$ ) MW 신호를 실은 입력 광신호가 스위치의 포트

I 로 라우팅되어 중심주파수가  $\nu_{m1} = \Delta\nu_{FSR1} \frac{c_0}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_{FSR1}$ 인

대역통과 MW 필터특성이 얻어진다<sup>[14]</sup>. 그리고  $V_{c1}$ 이 증가하여  $\Delta\phi$ 가 커짐에 따라 출력이 감소하여  $\pi$ 가 될 때 최소가 되며, 이와 같은 특성들을 그림 3에 나타내었다. 이 때  $V_{c2}$ 는 링 공진기에서의 위상변화가  $\pi$ 가 되어 출력이 최소가 되도록 인가되어있다. 채널 I 과 유사하

게 채널 II 에서는 중심주파수가  $\nu_{m2} = \Delta\nu_{FSR2} \frac{c_0}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_{FSR2}$ 이

고 인가전압  $V_{c2}$ 에 의해 출력이 가변되는 MW 필터특성이 얻어진다. 그림 4(a)에는 채널 I 의 출력이 최대가 되고 채널 II 의 출력이 최소가 되도록 인가전압을 조절한 경우의 개략적인 전달특성이 나타나 있다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 반대의 경우를 보여준다. 이로부터 그림 1(b)에 도시된 제안된 소자는 전기적으로 채널 선택이 가능한 재구성형 MW 필터로 동작함을 알 수 있다.

제안된 링 공진기 기반의 광스위치 구현에 사용된 도파로의 단면구조는 그림 5에 도시되어 있으며, 실리콘 기판 위에 형성된 하부클래딩, 코어, 상부클래딩, 그리고 전극으로 구성되어 있다. 도파로의 폭과 높이는 각각  $5 \mu\text{m}$ 와  $4.5 \mu\text{m}$ , 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.45와 1.43이며, 해당 코어-클래딩 굴절률 차  $\Delta n=1.4\%$ 이다. 공진기 I 의 경우에 링의 반경은  $R_1=3.3 \text{ mm}$ , 버스와 링 간의 간격은  $1.4 \mu\text{m}$ , 연결된 링 간의 간격은  $2.8 \mu\text{m}$ , 전극 폭은  $10 \mu\text{m}$ 이다. 그리고 공진기

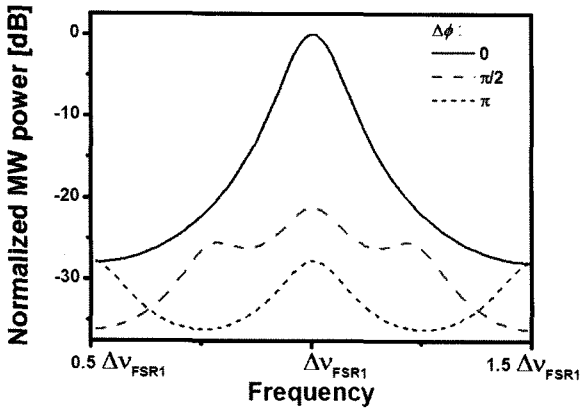


그림 3. MW 필터의 채널 I에서의 인가 전압에 따른 전달특성.

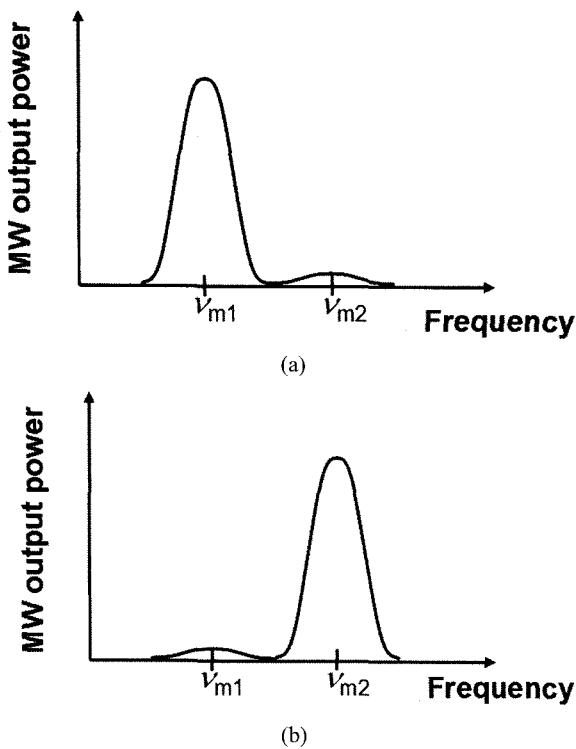


그림 4. 제안된 MW 필터의 전달특성.

- (a) 채널 I이 선택된 경우
- (b) 채널 II가 선택된 경우

II의 경우, 링 반경은  $R_2=1.65$  mm, 버스와 링 간의 간격은  $1 \mu\text{m}$ , 인접 링 간의 간격은  $3 \mu\text{m}$ , 전극 폭은  $10 \mu\text{m}$ 이다. 이로부터 얻어진 두 공진기의 FSR은 각각  $\Delta\nu_{FSR1}=10$  GHz ( $\Delta\lambda_{FSR1}=0.08$  nm)와  $\Delta\nu_{FSR2}=20$  GHz ( $\Delta\lambda_{FSR2}=0.16$  nm)이다. 공진기 I과 II는 채널의 중심주파수가 10 GHz와 20 GHz인 MW 대역통과 필터를 구현하는데 사용된다.

### III. 소자 제작 및 특성 측정

제안된 MW 필터의 핵심 요소인 폴리머 링 공진기 기반의

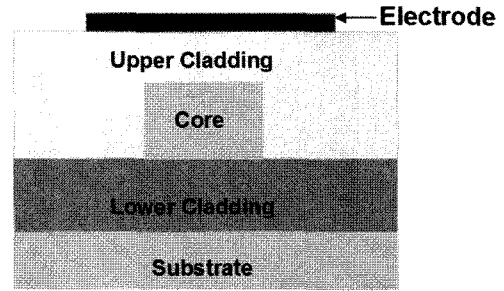
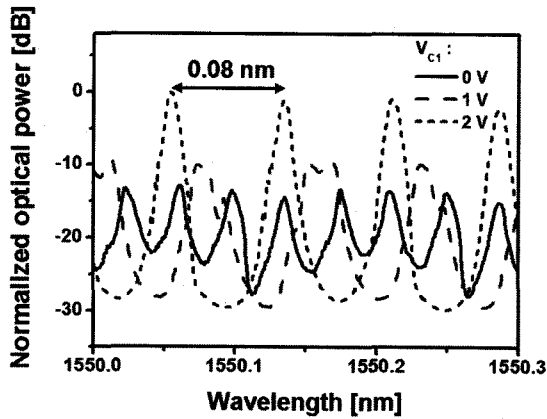


그림 5. 설계된 폴리머 링 공진기의 단면구조.

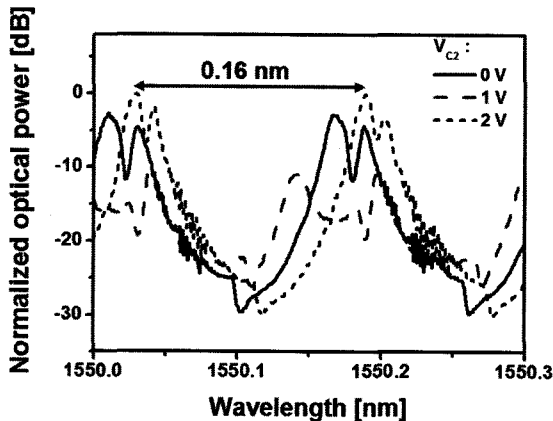
1x2 열광학 스위치를 제작하기 위하여 PLC (planar light-wave circuit) 표준 공정을 도입하였다. 먼저 ChemOptics사의 폴리머 ZPU430 ( $n=1.430$ )과 ZPU450 ( $n=1.450$ )을 스핀코팅하고 자외선 경화하여 각각  $\sim 10 \mu\text{m}$  두께의 하부클래딩과  $\sim 4.5 \mu\text{m}$  두께의 코어를 형성하였다. 그리고 포토리소그래피 공정과 건식 식각 공정을 통하여 코어에 도파로 패턴을 형성하고, 그 위에 ZPU430을 이용하여  $\sim 10 \mu\text{m}$  두께의 상부 클래딩을 형성하였다. 마지막으로 리소그래피와 선택적인 식각 공정을 이용하여 금 박막 전극을 만들고 효과적인 광결합을 위해 소자의 입출력 단면을 절단(dicing)하여 소자를 완성하였다. 공진기 I과 공진기 II의 전극의 측정된 저항값은 각각  $\sim 970 \Omega$ 와  $\sim 500 \Omega$ 이었다.

먼저, 그림 6에는 스위치를 구성하는 각 링 공진기의 전극에 인가된 전압에 따른 전달특성이 도시되어 있다. 공진기 I의 경우, 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 전압이  $V_{c1}=2$  V일 때 공진 파장에서의 출력과 소멸비가 최대가 되고  $V_{c1}=0$  V일 때 최소가 된다. 앞에서 논의된 이론 결과와는 달리 일정한 전압을 인가해야 출력이 최대가 되는 것은 제작공정 상의 오차로 인하여 두 링을 진행하는 도파모드 간에 유발된 초기 위상차이 때문이다. 이것은 일정한 전압을 인가하여 열광학 효과를 통해 보상될 수 있다. 위 그림에서 알 수 있듯이, 출력 및 소멸비가 최대인 경우에 FSR은  $\Delta\lambda_{FSR1}=0.08$  nm (또는  $\Delta\nu_{FSR1}=10$  GHz)이고 소멸비는  $\sim 30$  dB였다. 그리고 3 dB 파장 대역폭은  $0.008$  nm (또는 1 GHz)였고, 이로부터 얻어진 Q값은  $\sim 1.94 \times 10^5$ 이다. 다음으로, 공진기 II의 인가전압에 따른 전달특성이 그림 6(b)에 나타나 있다.  $V_{c2}=2$  V인 경우에 두 링 간의 위상 차이가 0이 되어 최대의 소멸비와 출력이 얻어지며,  $V_{c2}=1$  V인 경우에 위상 차이가  $\pi$ 가 되어 최소가 됨을 알 수 있다. 이 때, 예상대로 FSR은  $\Delta\lambda_{FSR2}=0.16$  nm ( $\Delta\nu_{FSR2}=20$  GHz)이고 소멸비는  $\sim 30$  dB였다. 그리고 대역폭은  $0.016$  nm (또는 2 GHz)였고, 이로부터 얻어진 Q값은  $\sim 9.7 \times 10^4$ 였다. 두 공진기 모두 공진파장 대역에서의 출력이 전기적으로 15 dB 정도 가변됨을 확인하였다.

제작된 공진기형 1x2 열광학 스위치를 이용하여 그림 1(b)에 나타난 채널 선택형 MW 필터를 구성하고 특성을 고찰하였다. 신호발생기에서 인가된 MW 신호는 광변조기를 구동하며, 광검출기의 출력은 스펙트럼 분석기에 의해 얻어졌다. 특히, 채널 I과 채널 II에 사용된 광검출기 PD I과 PD II의 대역폭은 각각  $\sim 12$  GHz와  $\sim 25$  GHz였다. 그림 7은 전기적으



(a)

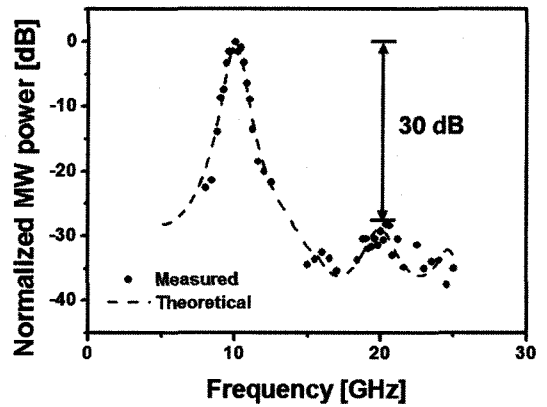


(b)

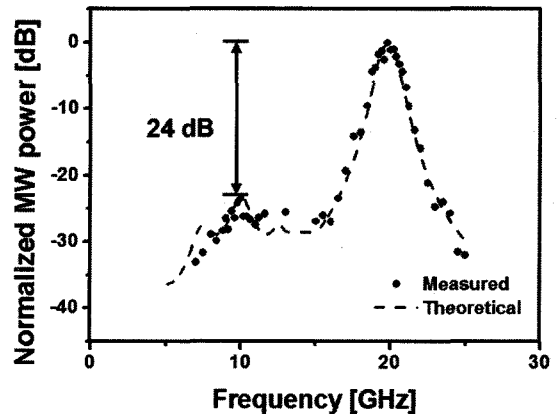
그림 6. 광스위치를 구성하는 각 링 공진기의 인가 전압에 따른 출력특성 변화.

- (a) 공진기 I의 포트 I
- (b) 공진기 II의 포트 II

로 채널이 선택되는 MW 필터의 출력특성을 보여준다. 첫째로, 그림 7(a)에는 채널 I (중심주파수  $\nu_{m1}=10$  GHz)의 출력이 최대가 되어 선택되고, 채널 II (중심주파수  $\nu_{m2}=20$  GHz)의 출력이 최소가 되어 차단되는 경우의 전달특성 보여준다. 이 때, 그림 6(a)의 결과에 따라 각 전극에 인가된 전압(전력)은  $V_{c1}=2$  V ( $P_{c1}=4.1$  mW)와  $V_{c2}=1$  V ( $P_{c2}=2.0$  mW)였다. 그림에서 알 수 있듯이, 예상대로 10 GHz 대역에서 필터 출력이 최대가 되었고 소멸비는 >30 dB였다. 특히, 채널 II와의 격리도는 ~30 dB였다. 그리고 3 dB 대역폭은 1 GHz였고, 이에 해당되는 Q값은 ~10이었다. 둘째로, 그림 7(b)는 채널 II의 출력이 최대가 되어 선택되고 채널 I의 출력이 최소가 되어 차단되는 경우의 전달특성을 보여준다. 이 때, 그림 6(b)의 결과를 참고하여 각 전극에 인가된 전압(전력)은  $V_{c1}=0$  V ( $P_{c1}=0$  mW)와  $V_{c2}=2$  V ( $P_{c2}= 8.0$  mW)였다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 20 GHz 대역에서 출력이 최대가 되며 소멸비는 ~30 dB였다. 그리고 채널 I 과의 격리도는 ~24 dB였다. 또한, 대역폭은 ~2 GHz, 해당되는 Q값은 10이었다. 그림 7(a)와 7(b)에는 이론적으로 계산된 필터의 전달특성도 함



(a)



(b)

그림 7. 제작된 재구성형 MW 대역통과 필터의 전달 특성.

- (a) 채널 I이 선택된 경우
- (b) 채널 II가 선택된 경우

께 도시되어 있는데, 측정결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 위에서 얻어진 실험결과를 고려할 때, 제안된 소자는 전기적으로 채널 선택이 가능한 재구성형 MW 대역통과 필터로서 우수하게 동작됨을 확인하였다.

한편, 제안된 MW 필터의 채널 주파수는 링 공진기의 반경을 변화시킴으로써 용이하게 조절할 수 있다. 또한, 다중 포트를 갖는 링 공진기형 1xN 광스위치 등을 도입함으로써 다중 채널 선택형 재구성형 MW 필터를 효과적으로 구현할 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 폴리머 링 공진기 기반의 1x2 광스위치를 이용하여 전기적으로 채널 선택이 가능한 재구성형 MW 대역통과 필터를 구현하였다. 채널 I (10 GHz)이 선택되었을 때 소멸비는 >30 dB, 3 dB 대역폭은 1 GHz, Q값은 ~10, 채널 II와의 격리도는 ~30 dB였다. 채널 II (20 GHz)가 선택되었을 때 소멸비는 ~30 dB, 대역폭은 ~2 GHz, Q값은 10, 채널 I과의 격리도는 ~24 dB의 특성을 얻었다. 또한 채널을 선택하기

위한 최대 소비전력은 각각 4.1 mW와 8 mW였다. 측정된 특성은 이론적으로 계산된 결과와 잘 일치하였으며, 이를 이용하여 차세대 통합시스템의 핵심 요소인 다중 채널 선택형 MW 필터를 효과적으로 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 2006년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노 IP/SoC 설계기술혁신 사업단」의 지원과 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-(C1090-0603-0008)).

### 참고문헌

- [1] A. Seeds, "Microwave photonics," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, pp. 877-887, 2002.
- [2] J. Capmany, D. Paster, B. Ortega, J. Mora, and M. Andres, "Photonic processing of microwave signals," IEEE Proc. Optoelectron., vol. 152, pp. 299-320, 2005.
- [3] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, "A tutorial on microwave photonic filters," J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 1, pp. 201-229, 2006.
- [4] M. Y. Frankel and R. D. Esman, "Fiber-optic tunable microwave transversal filter," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 2, pp. 191-193, 1995.
- [5] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Microwave optical filters using in-fiber Bragg grating arrays," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 6, no. 2, pp. 103-105, 1996.
- [6] H. H. Chen, M. Guizani, "Next generation wireless systems and networks," Wiley, 2006.
- [7] S. Hontsu, S. Mine, H. Nishikawa, M. Nakamori, A. Fujimaki, M. Inoue, A. Maehara and T. Kawai, "Study of mechanically tunable superconducting microwave filter using lumped elements," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 720-723, 2003.
- [8] M. K. Roy, C. Kalmar, R. R. Neurgaonkar, J. R. Oliver and D. Dewing, "A highly tunable radio frequency filter using bulk ferroelectric materials," Proc. 14<sup>th</sup> IEEE International symposium on applications of ferroelectrics IASF-04, pp. 25-28, Aug. 2004.
- [9] B. Vidal, V. Polo, J. L. Corral and J. Marti, "Photonic microwave filter with tuning and reconfiguration capabilities using optical switches and dispersive media," Electron. Lett., vol. 39, no. 6, pp. 547-549, 2003.
- [10] M. Delgado-Pinar, J. Mora, A. Diez, M. V. Andres, B. Ortega and J. Capmany, "Tunable and reconfigurable microwave filter by use of a Bragg-grating-based acousto-optic superlattice modulator," Opt. Lett., vol. 30, no. 1, pp. 8-10, 2005.
- [11] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," Electron. Lett., vol. 36, no. 4, pp. 321-322, 2000.
- [12] D. Geuzebroek, E. Klein, H. Kelderman, N. Baker and A. Driessen, "Compact wavelength-selective switch for gigabit filtering in access networks," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 17, no. 2, pp. 336-338, 2005.
- [13] S. Yamagata, T. Kato and Y. Kokubun, "Non-blocking wavelength channel switch using TO effect of doubles series coupled microring resonator," Electron. Lett., vol. 41, no. 10, pp. 593-595, 2005.
- [14] W. J. Chin, D. H. Kim, J. H. Song and S. S. Lee, "Integrated photonic microwave bandpass filter incorporating a polymeric microring resonator," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, no. 4A, pp. 2576-2579, 2006.

## Integrated Photonic Channel Selective Microwave Bandpass Filter Incorporating a 1x2 Switch Based on Tunable Polymeric Ring Resonators

Gun-Duk Kim and Sang-Shin Lee<sup>†</sup>

Department of Electronic Engineering, Kwangjuon University 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, South Korea

<sup>†</sup>E-mail: slee@kw.ac.kr

(Received December 13, 2006, Revised manuscript February 16, 2007)

A reconfigurable photonic microwave (MW) channel selective filter was demonstrated incorporating a 1x2 switch based on two tunable polymeric resonators with different free spectral ranges. Each resonator, consisting of two cascaded rings with an electrode formed on one of them, plays a role as an on/off switch through the thermo-optic effect. The optical signal carrying the MW signal is routed to either port of the switch and detected to show the filtered output at the frequency determined by the free spectral range of the corresponding resonator. When the channel centered at 10 GHz was chosen, the extinction ratio was ~30 dB, the bandwidth 1 GHz, and the electrical power consumption 4.1 mW. For the other channel located at 20 GHz, we have achieved the extinction ratio of ~30 dB, the bandwidth of 2 GHz, and the required power of 8.0 mW. Finally the crosstalk between the selected and blocked channels was higher than 24 dB.

OCIS code : 230.5750, 250.5460, 350.4010.